

ОТХОДЫ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАПРАВЛЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Часть 2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ФОРМ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОТХОДАХ ДОБЫЧИ, ПЕРЕРАБОТКИ И СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ

С.А. Силютин¹, С.А. Эпштейн², Т.О. Гущина²

¹ АО «СУЭК», Москва, Россия

² НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: apshstein@yandex.ru

Аннотация: Приведен обзор методов, использующихся в России и за рубежом для определения содержания мобильных форм (водорастворимых и подвижных) элементов в отходах добычи, переработки и сжигания углей. Результаты межлабораторных исследований разных авторов показывают, что концентрация в экстрактах, полученных при обработке отходов сжигания углей, таких элементов, как алюминий, мышьяк, селен, железо, ртуть, марганец, молибден и цинк, существенно зависит от особенностей применяемых методов. В Российской Федерации нормативной основой оценки влияния отходов на окружающую среду являются Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления. Для предварительной оценки водно-миграционной опасности отхода используют ориентировочный водно-миграционный показатель (ОВМП), который характеризует возможное отрицательное влияние на условия жизни и здоровье человека отхода в результате миграции его компонентов в грунтовые и поверхностные воды. Показано, что в настоящее время в России отсутствует нормативное обеспечение для оценки этого показателя в части содержания в отходах добычи, переработки и сжигания углей водорастворимых форм элементов. Внедрение разработанного в 2019 г. национального стандарта «Топливо твердое минеральное. Определение выхода и состава водорастворимых форм веществ» в практику работы аккредитованных испытательных лабораторий и профильных экологических организаций позволит перейти к достоверным и сопоставимым оценкам отходов добычи, переработки и сжигания углей.

Ключевые слова: отходы добычи и переработки углей, воздействие на окружающую среду, водорастворимые и подвижные формы элементов, методы анализа.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-35-90117.

Для цитирования: Силютин С. А., Эпштейн С. А., Гущина Т. О. Отходы добычи и переработки углей. Методические подходы к оценке их экологической безопасности и направлений использования. Ч. 2. Методы определения мобильных форм макро- и микроэлементов в отходах добычи, переработки и сжигания углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-16.

Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use.
Part 2. Methods for the determination of mobile forms of macro- and microelements in the wastes of coal mining, processing and combustion

S.A. Silyutin¹, S.A. Epshtein², Gushchina T.O.²

¹ JSC Siberian Coal and Energy Company (SUEK), Moscow, Russia

² National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: apshstein@yandex.ru

Abstract: A review is given on the methods used in Russia and abroad to determine the content of mobile forms (water-soluble and mobile) of elements in the wastes of mining, processing and combustion of coals. The results of interlaboratory studies of various authors have demonstrated that the concentration of such elements as aluminum, arsenic, selenium, iron, mercury, manganese, molybdenum and zinc in the extracts obtained from the processing of coal combustion waste, significantly depends on the features of the methods used. In the Russian Federation, the Sanitary Rules for determining the hazard class of toxic waste from production and consumption are the normative basis for assessing the impact of waste on the environment. For a preliminary assessment of the water-migratory hazard of waste, use is made of the provisional water-migration indicator, which characterizes the possible negative impact of the waste on the living conditions and human health as a result of the migration of its components to ground and surface waters. It is shown that currently in Russia there is no regulatory support for the assessment of this indicator in terms of the content of water-soluble forms of elements in the wastes of mining, processing and combustion of coals. Implementation of the developed in 2019 National standard «Solid mineral fuel. Determination of the yield and composition of water-soluble forms of substances» into the practice of the work of accredited testing laboratories and specialized environmental organizations will allow us to proceed with the reliable and comparable estimates of coal mining, processing and combustion wastes.

Key words: coal mining and processing wastes, environmental impact, leaching, leaching methods.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 19-35-90117.

For citation: Silyutin S.A., Epshtein S.A., Gushchina T.O. Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 2. Methods for the determination of mobile forms of macro- and microelements in the wastes of coal mining, processing and combustion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(5):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-16.

Введение

Элементы, способные выделяться в сточные воды, являются источником загрязнения вод в местах размещения породных отвалов, хвостохранилищ, золоотвалов и территорий, на которых планируется их использование, в том числе, для целей рекультивации. В нашей предыдущей статье [1] было отмечено, что

определение мобильности макро- и микроэлементов в составе минеральных отходов добычи и переработки углей является важным элементом оценки воздействия на окружающую среду при их размещении и вторичном использовании. Отсутствие единых подходов для определения мобильности макро- и микроэлементов в отходах и соответствующих

адекватных критериев для прогноза изменения состава поверхностных и подземных вод является причиной неоднозначных оценок при экспертизе проектов, направленных на использование отходов добычи и переработки углей, в том числе, для целей рекультивации. Это особенно важно в части отходов, образующихся при сжигании углей на ТЭЦ и региональных котельных. В настоящей статье будут проанализированы методы, которые применяются в разных странах для определения «вымываемости» макро- и микроэлементов, а также обсуждены некоторые вопросы, связанные с отечественной практикой таких оценок.

Зарубежный опыт определения мобильных форм элементов в отходах

Существующие в разных странах тесты на «вымываемость» различаются соотношением (Т/Ж) твердой фазы (отходы) и жидкости при проведении испытаний, химическим составом применяемых жидкостей, а также особенностями испытаний материалов разного гранулометрического и вещественного состава. Тесты для определения «вымываемости» элементов условно можно разделить на 2 категории: 1 — статическая экстракция, когда выщелачивание (экстракция) происходит в фиксированном объеме воды (или другой жидкости); 2 — динамическая экстракция, когда вода (или другая жидкость) постоянно обновляется в ходе эксперимента. В настоящей статье мы рассмотрим преимущественно статические тесты, наиболее широко применяющиеся в практике. В табл. 1 приведены характеристики наиболее распространенных статических методов. Как правило, эти методы применяются для широкого ассортимента отходов, в состав которых входят как органические, так и неорганические составляющие, что,

в свою очередь, определяет разные подходы к подготовке проб, выбору жидкости и, собственно, процедуре анализа.

В ряде работ обсуждаются вопросы, связанные с сопоставлением результатов определения «вымываемости» элементов из отходов сжигания углей разными методами. На рисунке представлены результаты межлабораторных исследований [2] по определению концентраций элементов в растворах, полученных методами, которые используются для оценок экологической характеристики отходов сжигания углей.

Краткая характеристика использованных методов

1. Процедура выщелачивания шахтной водой MWLP (Mine Water Leaching Procedure) [6]. Этот метод основан на определении поведения отходов сжигания углей при использовании в качестве жидкости кислых растворов, моделирующих дренажные шахтные воды. Порядок определения: 100 г пробы золы, 2 л деионизированной воды или 0,002 N раствор серной кислоты, соотношение Т/Ж = 1:20, тщательное перемешивание в течение 18 ч. После окончания перемешивания смесь фильтруют с помощью фильтра с размером пор 0,7 мкм. В полученном фильтрате определяют показатель pH и содержание элементов. Твердый остаток повторно заливают свежей порцией жидкости и повторяют все операции до тех пор, пока показатель pH фильтрата не станет равным 3.

2. Метод серийного выщелачивания — SBLP (Serial Batch Leaching Procedure) [7] предназначен для быстрого скрининга, наиболее подходящего для гранулированных материалов. Порядок определения:

А — быстрый тест. 9 г пробы заливают 450 мл деионизированной воды (Т/Ж = 1:50) и перемешивают с постоянной скоростью на магнитной мешалке в течение 2 ч. Смесь отфильтровывают

Таблица 1
Характеристика тестов на «вымываемость» отходов
Characteristic of waste washout ability tests

№	Организация / страна	Метод	Область применения	Тип жидкости	Размер частиц	Т/Ж	Число экстракций	Продолжительность, ч
1	Агентство по защите окружающей среды США (US EPA)	Er Tox [3]	классификация отходов по токсичности	Деионизированная вода с добавлением 0,4 М уксусной кислоты, рН = 5,0	менее 9,5 мм	16:1	1	24
2		TCCLP [4]		Деионизированная вода с добавлением ледяной уксусной кислоты и гидроксида натрия рН = 2,88 или рН = 4,93	менее 9,5 мм	от 19:1 до 21:1	1	16—18
3	Нидерланды	SPLP [5] ASTM D 6234	максимальная способность к выщелачиванию	Деионизированная вода с добавлением смеси минеральных кислот (серная и азотная кислоты в соотношении 60:40), рН = 4,2—5,0	менее 9,5 мм	20:1	1	18
4		NEN 7341:1995 nL		Деионизированная вода при рН = 7,0 и рН = 4,0	менее 125 мкм	50:1	2	3 ч на каждую экстракцию
5	Евросоюз	EN 12457	классификация гранулированных отходов и осадков	Деионизированная вода	менее 4 мм более 4 мм более 4 мм более 10 мм	2:1 10:1 2:1 10:1	1 1 2 1	

на фильтре с размером пор 0,45 мкм. В фильтрате измеряют рН и определяют концентрации элементов. К остатку добавляют свежую порцию воды, доводят рН до 8 единиц раствором азотной кислоты и перемешивают на магнитной мешалке в течение 3 ч. После этого смесь фильтруют и повторяют аналогичные операции при рН 4 и 2 (при этом время перемешивания сокращают до 2 ч). На всех этапах определяют концентрацию элементов в полученных фильтратах.

Б — долгосрочное моделирование. 45 г пробы и 90 мл деионизированной воды (Т/Ж = 1:2) перемешивают в бутылочном агитаторе в течение 6 ч. Смесь отфильтровывают на фильтре с размером пор 0,45 мкм, измеряют рН фильтрата и определяют концентрацию в нем элементов. Затем к твердому остатку добавляют свежую воду (Т/Ж = 1:8) и перемешивают тем же способом в течение 18 ч, фильтруют, измеряют рН и концентрацию элементов. Аналогично повторяют процедуру при Т/Ж = 1:10 и времени перемешивания 10 ч. Отдельно проводят аналогичные испытания при соотношении Т/Ж = 1:100. Для этого 10 г пробы и 1 л деионизированной воды перемешивают в бутылочном агитаторе в течение 24 ч, а затем фильтруют, определяют рН и концентрацию элементов.

3. Процедура выщелачивания жидкостью, имитирующей состав подземных вод — SGLP и долгосрочное выщелачивание — LNL (Synthetic Groundwater Leaching Procedure and Long Term Leaching) [8]. Этот метод был разработан для моделирования реальных условий размещения отходов в статичных и засушливых средах. Порядок определения:

Тест SGLP — 100 г пробы и 2 л деионизированной воды (Т/Ж = 1:20) перемешивают с постоянной скоростью в течение 18 ч. Смесь фильтруют с помощью фильтра, размер пор которого

0,45 мкм, измеряют рН фильтрата и содержание в нем элементов.

Тест LTL — вышеописанную процедуру повторяют в течение 30 и 60 дней.

4. Трехшаговый протокол выщелачивания — 3-Tier Leaching Protocol [9] применяют для расширенного исследования факторов, влияющих на поведение отходов при выщелачивании. Этот протокол применяют при реализации Комплексной программы оценки выщелачивания при управлении отходами и утилизации вторичных материалов (An Integrated Framework for Evaluating Leaching in Waste Management and Utilization of Secondary Materials) Агентства по защите окружающей среды США (EPA). Порядок проведения:

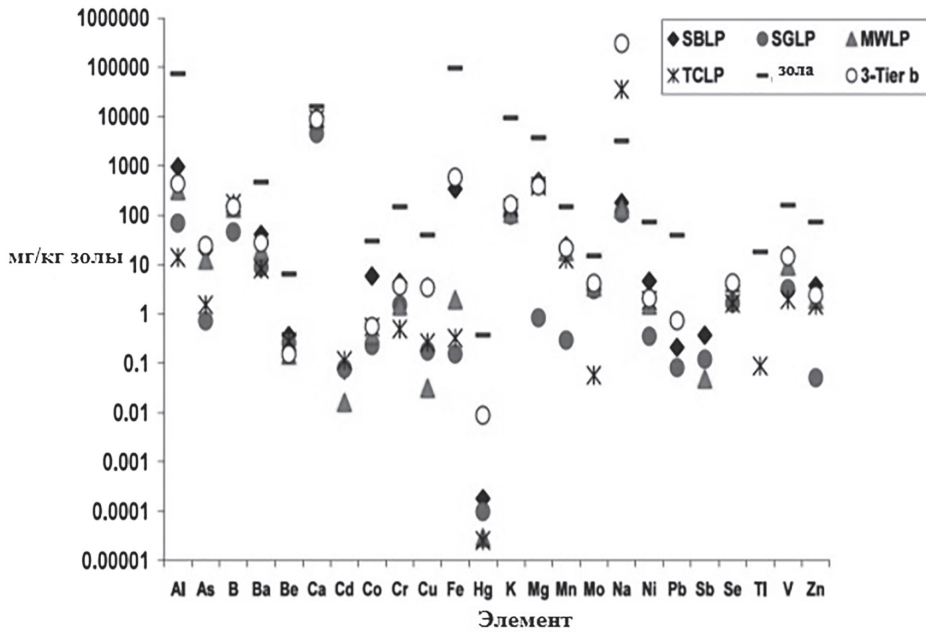
1 — предварительное тестирование. 8 г пробы и 800 мл деионизированной воды (Т/Ж = 1:100) титруют 0,5 М раствором этилендиаминтетрауксусной кислоты EDTA в интервале рН = 2–12.

Тест на «выщелачиваемость» А — 40 г пробы и 400 мл деионизированной воды (Т/Ж = 1:10) смешивают и добавляют буферные растворы таким образом, чтобы в 11 испытуемых пробах рН различался на 1 единицу в диапазоне от 3 до 12 единиц. Обязательно для испытания используют смесь без добавления буфера.

Тест на «выщелачиваемость» В проводят аналогично тесту А, но соотношение Т/Ж соответственно равно 1:10; 1:5; 1:2; 1:1. Отдельно тестируют 100 г пробы с водой при Т/Ж = 1:0,5.

Для тестов А и В применяют одинаковые условия — тщательное перемешивание с постоянной скоростью в течение 48 ч, фильтрование с размером пор фильтра 0,45 мкм, измерение рН экстракта и определение в нем содержания элементов.

5. Метод определения токсичности вод «выщелачивания» Ер Тох [3] приведен в табл. 1.



Концентрация элементов в экстрактах, полученных с использованием разных методов [2]
 Concentration of elements in extracts produced using different methods [2]

Полученные авторами результаты [2] показали, что содержание всех элементов в экстрактах меньше, чем их общее содержание в золе. Исключение составляют натрий и кальций, что может быть связано с их высоким содержанием в реагентах — деионизированной воде и кислотах. В целом по таким элементам, как алюминий, мышьяк, селен, железо, ртуть, марганец, молибден и цинк, их концентрация в экстрактах существенно зависит от особенностей применяемых методов. Максимальная концентрация большинства элементов зафиксирована при использовании 3-х шагового протокола выщелачивания, а минимальная — при реализации процедур MWLP и SGLP.

Кроме экспериментальной реализации процедур «вымываемости» элементов [10—12], существует и оценка полученных данных о содержании элементов в экстрактах в части их влияния на состав поверхностных и подземных вод. В качестве критерия в большинстве ис-

пользуемых подходов применяют показатели, отражающие соотношение между полученной экспериментально концентрацией элемента в фильтрате и его предельно допустимой концентрацией в соответствующих водах, регламентированной экологическим законодательством. Такие подходы вызывают большое количество вопросов из-за отсутствия единого мнения о том, какое превышение концентрации следует считать опасным. В связи с этим вопросы применения отдельных методик для определения «вымываемости» элементов из отходов добычи, переработки и сжигания углей требуют дальнейших исследований и уточнений.

Российская практика оценки отходов добычи, переработки и сжигания углей

Нормативной основой оценки влияния отходов добычи, переработки и сжигания углей на окружающую среду являются Санитарные правила по опре-

делению класса опасности токсичных отходов производства и потребления (СП 2.1.7.1386-03 с изменениями на 31 марта 2011 года), утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации — первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко. СП 2.1.7.1386-03 предлагает расчетный и экспериментальный методы определения опасности отходов. Экспериментальная оценка степени опасности отхода базируется на принципиальных положениях методологии гигиенического нормирования химических загрязнений среды обитания человека (почва, вода, воздух и др.), а также включает методы, допущенные для целей государственного санитарно-эпидемиологического надзора.

Экспериментальный метод позволяет определить класс опасности отхода как единого целого с учетом комбинированного, комплексного действия его компонентов и продуктов их трансформации на здоровье человека и среду его обитания. Обязательным этапом оценки опасности отхода являются исследования по идентификации его химического состава.

Экспериментальная оценка опасности отхода проводится поэтапно, по сокращенной или расширенной схеме. Сокращенная схема оценки опасности отходов включает, в том числе, предварительную оценку водно-миграционной опасности. Расширенная схема исследования отходов проводится в зависимости от результатов предварительной оценки и включает постановку длительных модельных опытов. Оценка опасности отхода по расширенной схеме обязательна: при предполагаемом использовании отхода в сельском хозяйстве; при производстве товаров народного потребления; во всех случаях, когда возможно контактное, ингаляционное, перораль-

ное или комплексное действие компонентов отхода на здоровье человека. Идентификация компонентов отхода проводится с учетом технологии их образования. Стандартными методами химического анализа, наряду с валовым содержанием ингредиентов, определяются водорастворимые, а также подвижные формы элементов, извлекаемые ацетат-аммонийным буфером (рН = 4,8). Для предварительной оценки водно-миграционной опасности отхода используется ориентировочный водно-миграционный показатель (ОВМП), который характеризует возможное отрицательное влияние отхода на условия жизни и здоровье человека в результате миграции его компонентов в грунтовые и поверхностные воды. ОВМП определяется по результатам комплексного химического анализа ацетатно-аммонийного буферного (ОВМП_б) и водного (ОВМП_в) экстрактов, отражающих содержание в отходе подвижных и водорастворимых форм элементов.

Расчет величины ориентировочного водно-миграционного показателя проводится по результатам химического анализа буферного экстракта отхода (ОВМП_б) и водного экстракта (ОВМП_в) по формулам:

$$ОВМП_б = \sum \frac{C_i^б}{ПДК_i^б},$$

$$ОВМП_в = \sum \frac{C_i^в}{ПДК_i^в},$$

где $C_i^б$ и $C_i^в$ — фактические концентрации i -го компонента в буферном и водном экстрактах соответственно, мг/л; $ПДК_i^б$ — предельно-допустимая концентрация содержания данного компонента в воде водоемов, мг/л; \sum — сумма.

В соответствии с таблицей Приложения № 6 СП 2.1.7.1386-03, эколого-гигиенические показатели и критерии отнесения отходов к классам опасности в части водных объектов даны в табл. 2.

Таблица 2

Показатели и критерии опасности компонента отхода в части воздействия на водные объекты (Приложение № 6 СП 2.1.7.1386-03)
Exponents and criteria of waste element hazard in terms of its impact on water bodies (Appendix No. 6 SP 2.1.7.1386-03)

№ п/п	Показатели опасности	Классы опасности			
		I	II	III	IV
		чрезвычайно-опасные	высоко-опасные	умеренно-опасные	мало-опасные
1	ОВМП	>1000	>100 – 1000	>10 – 100	10
2	ОВМП	>100	>50 – 100	>10 – 50	>3 – 10
3	Водно-миграционный (превышение ПДК веществ, определяемых в фильтрате)	>30	>10 – 30	>5 – 10	1 – 5

Реализация этого документа предусматривает наличие надежного методического обеспечения в части определения показателей ОВМП в отходах добычи, переработки и сжигания углей. В табл. 3 приведены перечень и описание мето-

дов, которые в настоящее время регламентируют определения металлов и анионов в растворимых (мобильных) формах в достаточно общем ассортименте отходов. В этих методиках используется одинаковое соотношение Т/Ж (1:10),

Таблица 3

Методы определения водорастворимых и подвижных форм веществ в отходах
Methods to determine water-soluble and mobile species of substances in waste

Название методики	Метод определений
ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.78-2013 Количественный химический анализ почв Методика измерений массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-адсорбционной спектроскопии	Т/Ж=1:10 Ацетатно-аммонийный буферный раствор, без постоянного перемешивания в течение 24 ч. Контроль pH в экстракте не производится
ПНД Ф 16.1.8-98 Количественный химический анализ почв Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах почв (водорастворимая форма) методом ионной хроматографии	Т/Ж = 1:10 Жидкость – бидистиллированная вода, перемешивание периодическое, в течение 30 мин
ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08 Методика выполнения измерений массовых долей подвижных форм металлов (цинка, меди, никеля, марганца, свинца, кадмия, хрома, железа, алюминия, титана, кобальта, мышьяка, ванадия) в почвах, отходах, компостах, кеках, осадках сточных вод атомно-эмиссионным методом с атомизацией в индуктивно-связанной аргоновой плазме	Т/Ж = 1:10 Ацетатно-аммонийный буферный раствор, без постоянного перемешивания в течение 24 ч. Контроль pH в экстракте не производится

но отсутствуют требования по постоянно-му перемешиванию реакционной смеси, контролю pH и проведению измерений при разных значениях этого показателя. Следует отметить, что порядок определения водорастворимых форм элементов в отходах добычи и переработки углей вообще отсутствует в Российской Федерации. Применение же существующих методов для характеристики отходов добычи, переработки и сжигания углей приводит к достаточно субъективным оценкам показателей их опасности и делает практически невозможным сопоставление с зарубежными аналогами.

В работах [13–15] изучено распределение токсичных элементов в золошлаковых отходах и установлены взаимосвязи между валовым содержанием элементов и их подвижными формами. Установлено, что золошлаковые отходы от сжигания углей Кузбасса характеризуются сильной корреляционной связью между подвижными формами кобальта и никеля, между валовыми и подвижными формами марганца и свинца. Во вскрышных и вмещающих породах угольных месторождений Кузбасса изучено распределение токсичных элементов, для которых установлен следующий ряд активности их водорастворимых форм: $Mo > Cu > V > Zn > Mn > As > Cr > Ni > Pb$. Показано, что загрязнение водных объектов Кемеровской области тяжелыми металлами происходит в том числе за счет вымывания при фильтрации природных водных потоков через массы вскрышных и вмещающих пород.

Заключение

Возвращаясь к вопросу критериев, относительно которых производятся оценки влияния «вымываемости» элементов из отходов добычи и сжигания углей на окружающую среду, следует отметить, что информация только о превышении концентраций элементов относительно

их предельных содержаний (ПДК) не позволяет количественно прогнозировать поступление этих элементов в окружающую среду. Для подобных оценок необходимо понимать, какая часть отходов (по массе) может перейти в растворимую форму. В работе [16] показано, что в качестве такой характеристики можно использовать выход водорастворимых форм веществ из отходов добычи (вскрышные и вмещающие породы, окисленные угли) и сжигания (золы уноса, шлаки) углей. Дополнительное использование этого показателя позволит в перспективе перейти к более достоверным оценкам проектов, направленных на вторичное использование минеральных отходов, в том числе, для целей рекультивации. В части нормативного обеспечения таких работ в настоящее время используют ПНД Ф 16.2.2.3.32-02 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания сухого и прокаленного остатка в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шлаках, активном иле, донных отложениях гравиметрическим методом». В отличие от методов извлечения подвижных элементов (табл. 3), эта методика регламентирует соотношение Т/Ж около 1:5 и перемешивание в течение 6 ч.

В 2015–2019 гг. в научно-учебной испытательной лаборатории «Физико-химии углей» НИТУ «МИСиС» совместно со специалистами АО «Западно-Сибирский испытательный центр» и предприятий АО «СУЭК» были проведены обширные исследования, направленные на разработку отечественного метода определения выхода и состава водорастворимых форм веществ в отходах добычи, переработки и сжигания углей. Были исследованы более 300 проб вскрышных и вмещающих пород разных угольных бассейнов и месторождений, более 100 проб отходов

сжигания бурых и каменных углей на ТЭЦ и местных котельных.

В настоящее время закончена разработка национального стандарта «Топливо твердое минеральное. Определенные выходы и состава водорастворимых форм веществ», введение которого планируется в 2021 г. Этот стандарт устанавливает метод определения выходов водорастворимых форм веществ (водорастворимые вещества) из лигнитов, бурых и каменных углей, антрацита, отходов их добычи и обогащения, а также из твердых отходов сжигания углей и ма-

териалов на их основе (топливо, твердое минеральное топливо). Макро- и микроэлементный состав водорастворимых веществ определяют стандартными методами, установленными для анализа природных, сточных и очищенных сточных вод. Внедрение разработанного стандарта в практику работы аккредитованных испытательных лабораторий и профильных экологических организаций позволит перейти к достоверным и сопоставимым оценкам отходов добычи, переработки и сжигания углей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силютин С. А., Эпштейн С. А. Отходы добычи и переработки углей. Методические подходы к оценке их экологической безопасности и направлений использования. Ч. 1. Характеристика твердых отходов добычи и переработки углей в зарубежных странах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 4. — С. 5–19. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-19.
2. Hesbach P., Burgers C., Greiner A., Hasett D. J., Heebink L. V., Beck M., Eick M., Daniels W. L. Inter-laboratory comparison of leaching methods. 2005 World of coal ash, Lexington. April 11 – 15, 2005. <http://www.flyash.info/2005/69hes.pdf>.
3. *METHOD 1310B*. Extraction procedure (EP) toxicity test method and structural integrity test [Электронный ресурс]. URL: www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1310b.pdf.
4. *METHOD 1311*. Toxicity characteristic leaching procedure [Электронный ресурс] URL: www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1311.pdf.
5. *METHOD 1312*. Synthetic precipitation leaching procedure [Электронный ресурс] URL: www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1312.pdf.
6. Ziemkiewicz P. F., Simmons J. S., Knox A. S. The mine water leaching procedure: evaluating the environmental risk of backfilling mines with coal ash / Chemistry of trace elements in fly ash, Springer, Boston, MA, 2003, pp. 75 – 90. DOI:10.1007/978-1-4757-4757-7.
7. Hesbach P. A., Kim A. G., Abel A. S. P., Lamey S. C. Serial batch leaching procedure for characterization of coal fly ash // Environmental Monitoring and Assessment. 2009. Vol. 168. No 1 – 4. Pp. 523 – 545. DOI: 10.1007/s10661-009-1132-1.
8. Hasset D. J. Synthetic groundwater leaching procedure / Encyclopedia of environmental analysis and remediation. Meyers R. A. (Ed.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1998. Pp. 4797 – 4803.
9. Kosson D. S., van der Sloot H. A., Sanchez F., Garrabrants A. C. An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials // Environmental Engineering Science. 2002. Vol. 19. No 3. Pp. 159 – 203.
10. Manoj Kumar Tiwari, Samir Bajpaia, Dewangan U. K., Raunak Kumar Tamrakar Suitability of leaching test methods for fly ash and slag. A review // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2015. Vol. 8. Issue 4. Pp. 523 – 537. DOI:10.1016/j.coal.2011.10.006
11. Lei Zhao, Shifeng Dai, Finkelman R. B., French D. Leaching behavior of trace elements from fly ashes of five Chinese coal power plants // International Journal of Coal Geology. 2020. Vol. 219. Article 103381. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103381.

12. Nidhi Gupta, Vidyadhar V. Gedam, Chandrashekhar Moghe, Pawan Labhasetwar Comparative assessment of batch and column leaching studies for heavy metals release from coal fly ash bricks and clay bricks // *Environmental Technology & Innovation*. 2019. Vol. 16. Article 100461. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100461.

13. Журавлева Н. В., Потокина Р. Р., Исмагилов З. Р., Нагайцева Н. В. Изучение распределения макро- и микроэлементов в отходах углеобогащения // *Химия в интересах устойчивого развития*. — 2016. — Т. 24. — № 6. — С. 761–767.

14. Журавлева Н. В., Иваницыкина О. В., Исмагилов З. Р. Изучение распределения токсичных элементов в золошлаковых отходах предприятий топливно-энергетического комплекса Кемеровской области // *Химия в интересах устойчивого развития*. — 2013. — Т. 21. — С. 479–486.

15. Журавлева Н. В., Иваницыкина О. В., Исмагилов З. Р. и др. Содержание токсичных элементов во вскрышных и вмещающих породах угольных месторождений Кемеровской области // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2015. — № 3. — С. 187–196.

16. Фоменко Н. А. Применение бурых углей для повышения экологической безопасности утилизации золошлаковых отходов в условиях их контакта с водой // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2019. — № 4. — С. 62. Депонировано 14.03.2019, № 1179/04-19. **ИИАС**

REFERENCES

1. Silyutin S.A., Epshtein S.A. Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 1. Characterization of solid wastes from coal mining and processing in foreign countries. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(4):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-19.

2. Hesbach P., Burgers C., Greiner A., Hasett D. J., Heebink L. V., Beck M., Eick M., Daniels W. L. Inter-laboratory comparison of leaching methods. *2005 World of coal ash*, Lexington. April 11–15, 2005. <http://www.flyash.info/2005/69hes.pdf>.

3. *METHOD 1310B*. Extraction procedure (EP) toxicity test method and structural integrity test. URL: www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1310b.pdf.

4. *METHOD 1311*. Toxicity characteristic leaching procedure. URL: www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1311.pdf.

5. *METHOD 1312*. Synthetic precipitation leaching procedure. URL: www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1312.pdf.

6. Ziemkiewicz P. F., Simmons J. S., Knox A. S. The mine water leaching procedure: evaluating the environmental risk of backfilling mines with coal ash. *Chemistry of trace elements in fly ash*, Springer, Boston, MA, 2003, pp. 75–90. DOI:10.1007/978-1-4757-4757-7.

7. Hesbach P.A., Kim A. G., Abel A. S. P., Lamey S. C. Serial batch leaching procedure for characterization of coal fly ash. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2009. Vol. 168. No 1–4. Pp. 523–545. DOI: 10.1007/s10661-009-1132-1.

8. Hasett D. J. Synthetic groundwater leaching procedure. *Encyclopedia of environmental analysis and remediation*. Meyers R.A. (Ed.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1998. Pp. 4797–4803.

9. Kosson D. S., van der Sloot H. A., Sanchez F., Garrabrants A. C. An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials. *Environmental Engineering Science*. 2002. Vol. 19. No 3. Pp. 159–203.

10. Manoj Kumar Tiwari, Samir Bajpaia, Dewangan U. K., Raunak Kumar Tamrakar Suitability of leaching test methods for fly ash and slag. A review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2015. Vol. 8. Issue 4. Pp. 523–537. DOI:10.1016/j.coal.2011.10.006

11. Lei Zhao, Shifeng Dai, Finkelman R. B., French D. Leaching behavior of trace elements from fly ashes of five Chinese coal power plants. *International Journal of Coal Geology*. 2020. Vol. 219. Article 103381. DOI: 10.1016/j.coal.2019.103381.

12. Nidhi Gupta, Vidyadhar V. Gedam, Chandrashekhar Moghe, Pawan Labhassetwar Comparative assessment of batch and column leaching studies for heavy metals release from coal fly ash bricks and clay bricks. *Environmental Technology & Innovation*. 2019. Vol. 16. Article 100461. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100461.

13. Zhuravleva N. V., Potokina R. R., Ismagilov Z. R., Nagaytseva N. V. Study of the distribution of macro- and microelements in coal beneficiation wastes. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2016. Vol. 24, no 6, pp. 761 – 767. [In Russ].

14. Zhuravleva N. V., Ivanykina O. V., Ismagilov Z. R. Study of the distribution of toxic elements in ash and slag wastes of enterprises of the fuel and energy complex of the Kemerovo region. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2013. Vol. 21, pp. 479 – 486. [In Russ].

15. Zhuravleva N. V., Ivanykina O. V., Ismagilov Z. R. Toxic elements content in overburden and host rocks of coal deposits of the Kemerovo region. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 3, pp. 187 – 196. [In Russ].

16. Fomenko N.A. The use of brown coal to improve environmental safety of disposal of bottom ash waste in terms of their contact with water. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(4):62. Deposited manuscript, 14.03.2019, No 1179/04-19. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Силютин Сергей Алексеевич – канд. техн. наук,
АО «СУЭК», e-mail: silutinsa@suek.ru,

Эпштейн Светлана Абрамовна¹ – д-р техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: apshtein@yandex.ru.,

Гущина Татьяна Олеговна¹ – аспирант, инженер,
e-mail: gushchina.t.o@gmail.com,

¹ Научно-учебная испытательная лаборатория
«Физико-химии углей» НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Эпштейн С.А.,
e-mail: apshtein@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.A. Silyutin, Cand. Sci. (Eng.),
JSC Siberian Coal and Energy Company (SUEK),
Moscow, Russia, e-mail: silutinsa@suek.ru,

S.A. Epshtein¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,
e-mail: apshtein@yandex.ru,

T.O. Gushchina¹, Graduate Student, Engineer,
e-mail: gushchina.t.o@gmail.com,

¹ Scientific and Educational Testing Laboratory
«Physics and Chemistry of Coals»,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: S.A. Epshtein,
e-mail: apshtein@yandex.ru.

Получена редакцией 27.01.2020; получена после рецензии 21.02.2020; принята к печати 20.03.2020.

Received by the editors 27.01.2020; received after the review 21.02.2020; accepted for printing 20.03.2020.

